奖赏对工作记忆提取准确性的促进及其机制

牛 惠[1] 胡艳梅[1] 郑旭涛[1] 姜英杰[1] 刘 佳[1]

([1]东北师范大学心理学院，长春 130024)

摘 要 根据任务需要准确提取工作记忆表征对提高认知效率具有重要意义。但工作记忆提取准确性的调节因素及机制尚不清楚。本研究以关系人类生存和发展的价值因素为切入点，在工作记忆提取阶段呈现奖赏线索，分别采用单次提取(实验 1)与连续提取任务(实验 2)考察工作记忆提取过程的奖赏调节机制。考察工作记忆提取过程的奖赏调节机制。实验 1 和 2 分别采用单次提取和连续提取任务。本研究发现：(1)奖赏可以直接促进工作记忆提取准确性；(2)奖赏促进作用的机制是对工作记忆资源的再分配；(3)奖赏促进作用受提取顺序和个体工作记忆能力差异的影响。这些发现揭示了工作记忆提取阶段的奖赏调节机制，为促进认知效率提供了科学依据。

关键词 工作记忆，奖赏，提取准确性

1 引言

工作记忆是人类实现目标导向行为的关键，影响着人类的生存和发展。在工作记忆过程中，个体不仅要储存和加工周围的环境信息，还要提取相关表征与之进行交互(Baddeley, 1992, 2000; Baddeley & Hitch, 1974; Cowan, 2017; Eriksson et al., 2015)。个体能否根据任务需要准确提取工作记忆表征是有效推进目标导向活动的关键。因此，揭示工作记忆提取准确性的调节机制，对促进认知活动效率和社会适应具有重要意义。但以往关注这一科学问题的研究还相对较少。

奖赏关系着价值计算，显著地影响着人类的认知和行为。如，奖赏可以促进工作记忆加工(Atkinson et al., 2018; Beck et al., 2010; Bowen et al., 2020; Gong & Li, 2014; Gong et al., 2016; Hitch et al., 2018, 2020; Kiss et al., 2009; Klyszejko et al., 2014; Lin & Fougnie, 2022; Valentin & O'Doherty, 2009)。这种促进作用既可以基于对工作记忆表征的增强(Gong & Li, 2014; Klink et al.,2017)，也可以基于对工作记忆资源的再分配(Hitch et al., 2018; Hu et al., 2014)。如 Gong 和 Li(2014)发现高奖赏关联项目虽未获得更多的空间注意，但其表征却保持的更好。Hu 等人(2014)在序列记忆任务中发现：对序列中首位(或末位)项目赋予高分值时，其记忆成绩的提高会伴随近因(或首因)效应的减弱。这表明奖赏可以引导总量不变的、有限的资源在不同项目

收稿日期：2023-05-12
* 吉林省自然科学基金 (20230101149JC)；国家自然科学基金面上项目 (32271095)。
通讯作者：胡艳梅，E-mail：huym653@nenu.edu.cn

间重新分配。

但以往研究主要关注了奖赏对工作记忆编码(Allen & Ueno, 2018; Hitch et al., 2018; Hu et al., 2014; Klink et al., 2017; Lin & Fougnie, 2022)和保持(Dodgson & Raymond, 2020; Thomas et al., 2016)过程的影响，在提取阶段考察奖赏调节作用的研究很少，且结果存在争议。多数研究在提取阶段之前呈现奖赏信号，结果发现奖赏可以调节个体对项目的提取(Grogan et al., 2022; Taylor et al., 2004)；而极少数研究直接在提取阶段呈现奖赏信号，结果发现奖赏不影响提取过程(Klink et al., 2017)。具体而言，Taylor 等人(2004)采用 fMRI 技术考察编码阶段出现的奖赏信号分别如何影响工作记忆编码、保持和提取阶段。结果发现，奖赏在不同记忆阶段激活的脑区不同。奖赏在编码阶段主要激活腹外侧前额叶、楔前叶等区域，在保持阶段主要激活额叶、顶内沟等区域，在提取阶段主要激活背外侧前额叶、额中回等区域。Grogan 等人(2022)考察了奖赏调节工作记忆的机制及其作用阶段，发现奖赏能影响提取过程。任务要求被试记忆若干项目，延迟一段时间后再进行记忆测试。奖赏线索可能出现在编码之前或保持阶段。记忆测试要求被试连续调节探测刺激方向使之与对应记忆项目一致。通过对被试反应的目标选择概率和猜测率等进行分析，可以检验奖赏对提取过程的影响。结果发现，奖赏能够提高提取过程中个体基于目标特征进行反应的概率，从而提高工作记忆的准确性。但 Klink 等人(2017)却发现奖赏不影响工作记忆提取过程。他们采用延迟探测任务，要求被试首先记忆三个有方向的圆形光栅，随后在提取阶段任意选取其中一个记忆项目进行探测。奖赏线索为三个颜色不同的圆环。其颜色分别与高、低和无奖赏对应，其呈现位置与记忆项目对应。奖赏线索或者与记忆项目同时出现(编码阶段)，或者在延迟阶段出现(保持阶段)，或者与探测项目同时出现(提取阶段)。结果发现，仅当奖赏线索出现在编码阶段时，高奖赏项目记忆准确性更高。而在保持和提取阶段出现的奖赏信号不能调节工作记忆过程。

可见，在提取之前呈现奖赏信号的研究发现奖赏可以调节工作记忆加工(Grogan et al., 2022; Taylor et al., 2004)，这反映了人们根据项目价值调整学习策略的能力。但这类研究无法回答奖赏是否能够独立影响工作记忆提取过程。日常生活中，项目价值并不总是在测试之前(如学习过程中，即编码阶段)就预设好的，往往要在测试发生时(如实际问题的解决过程中，即提取阶段)才能体现出来。根据任务需求及其变化灵活调整项目提取的准确性对目标导向行为具有重要意义。因此，在提取阶段呈现奖赏信号，以排除编码和保持过程影响，是独立考察提取阶段奖赏调节作用的更适当方式。但采用此类操作的研究极少，且研究结果表明奖赏不影响工作记忆提取准确性(Klink et al., 2017)。为检验该结果的可靠性，有必要进行更多的实证研究。

此外，奖赏调节工作记忆提取过程的机制也不清楚。前已述及，以往研究发现奖赏对工作记忆加工的调节作用主要基于表征强化和资源再分配两种机制。但具体到提取阶段，奖赏将如何影响工作记忆表征和资源分配尚不明确。以往关注工作记忆提取规律和机制的研究主要采用连续提取任务(Myers et al., 2018; Park et al., 2017; Woodman & Vecera, 2011)。即要求被试首先记忆多个项目，随后在测试阶段依次提取每个项目。一方面，研究普遍发现先提取的项目成绩更好(Rerko et al., 2014)。即选择性地提取工作记忆中的某一个客体表征，会导致随后需要报告的其他客体表征的记忆准确性下降。另一方面，相关研究在后提取项目表征如何受损方面看法不一(Park et al., 2017; Woodman & Vecera, 2011)。如 Woodman 和 Vecera (2011)认为连续提取过程中所有的保持机制都集中于当前提取的项目上，从而对其他项目的记忆痕迹造成损害。而 Park 等人(2017)则认为后探测项目成绩下降的原因并不是存储表征的精度下降，而是由于记忆表征完全丧失。如果后提取项目的表征仅仅是精度下降，则奖赏有可能通过调节资源分配来改善其准确性；如果后提取项目表征完全丧失，则其提取准确性不受调节。但目前关注奖赏与工作记忆提取的研究主要采用单次提取任务，即要求被试首先记忆多个项目，随后在测试阶段随机选取一个项目进行探测。这类任务难以揭示提取过程中不同项目间表征精度和资源分配的差异。因此，有必要采用连续提取范式进一步考察奖赏调节工作记忆提取过程的机制。

综上，目前考察工作记忆提取阶段奖赏调节作用的实证证据还比较匮乏，且研究结果存在争议。一方面，多数研究在编码或保持阶段引入奖赏信号，难以独立考察奖赏对提取过程的影响。个别在提取阶段呈现奖赏信号的研究，其结果有待进一步检验。另一方面，多数研究采用单次提取任务，难以考察奖赏对同一试次不同项目提取准确性的影响及其差异。而对该差异的比较和分析是揭示提取阶段奖赏调节机制的重要途径。因此，本研究在提取阶段呈现奖赏信号，同时结合单次提取(实验 1)和连续提取(实验 2)任务，可以：1)进一步检验奖赏是否能够独立调节工作记忆提取；2)首次系统考察奖赏对连续提取过程中不同项目表征和资源分配的影响，以揭示奖赏调节工作记忆提取的机制。同时，基于以往研究发现认知策略的使用受到个体工作记忆能力的影响(Griffin et al., 2019; Robison & Unsworth, 2017; Turley-Ames & Whitfield, 2003)，本研究也将分析奖赏调节工作记忆提取的个人差异。

实验 1 采用单次提取任务检验奖赏是否能够影响工作记忆提取准确性。关键变量为提取线索的奖赏水平。如果奖赏可以调节提取过程，则提取准确性随奖赏水平的增加而升高。实验 2 采用连续提取任务，结合前、后测实验设计考察奖赏调节工作记忆提取准确性的机制。要求被试在测试阶段依次提取探测项目 1 (T1)和探测项目 2 (T2)。前测为无奖赏基线。同一

试次的两次提取过程分别伴随不同颜色的提取线索，但其颜色与奖赏无关。如果线索颜色本身不影响提取过程，则前测成绩只受提取顺序影响，即 T2 成绩差于 T1。后测为有奖赏条件。实验任务与前测相同，但不同颜色的提取线索分别与高、低奖赏关联，且高奖赏线索出现位置在试次间平衡。一方面，如果奖赏可以消除 T2 的劣势，则探测项目主效应不显著，探测项目和高奖赏线索位置交互作用显著。如果奖赏仅能在一定程度上改善(而非消除)T2 的劣势，则探测项目主效应显著，探测项目和高奖赏线索位置交互作用显著。如果奖赏不影响提取过程，则仅探测项目主效应显著。另一方面，如果奖赏调节提取过程的机制是增强记忆表征，则高奖赏线索位置主效应显著。即高奖赏线索伴随 T2 出现时平均记忆成绩好于高奖赏线索伴随 T1 出现时。前者 T1 和 T2 分别受到提取顺序和奖赏的促进，而后者仅 T1 受到促进。反之若奖赏的调节机制是资源再分配，则高奖赏线索位置不影响平均记忆成绩。

2 实验 1 奖赏对工作记忆提取准确性的促进作用

实验 1 采用单次提取任务，考察提取阶段出现的奖赏线索是否可以促进工作记忆提取准确性。包括联结学习和工作记忆测试两个阶段，被试首先通过联结学习建立不同颜色与价值的联结，随后进行工作记忆测试。如果高奖赏项目的记忆成绩更好，则表明奖赏可以在不影响编码和保持的前提下，独立促进工作记忆提取过程。

2.1 方法

2.1.1 被试

使用 G*power 软件(Faul et al., 2007, 2009)估算所需样本量，设置$\alpha = 0.05$，$1–\beta = 0.95$。参考 Grogan 等人(2022)研究中奖赏效应的效应量($\eta_p^2 = 0.21$)，设置 $f = 0.52$，估计出最小样本量为 12。随后招募 24 名在校大学生(其中男性 7 名，女性 17 名)自愿参与本实验，年龄在 18~24 岁之间($M = 21.61$, $SD = 2.87$)。实验 1 通过了东北师范大学心理学院伦理委员会审查。被试对实验目的未知，实验报酬根据记忆任务成绩表现按比例发放。

2.1.2 设备和实验刺激

实验在一个光线昏暗的房间内进行，被试坐在距离屏幕 57 厘米处。实验程序采用 Psychopy 编写(Peirce, 2007; Peirce et al., 2019, 2022)，呈现在 19 英寸 CRT 显示器上，分辨率为 1024×768，刷新率为 120Hz。

联结学习阶段的刺激为三个由彩色噪点填充的圆形(视角 5°×5°)，分别呈现在以中央注视点为中心的、半径为 5°的虚拟圆的 12 点、4 点和 8 点钟位置上。同屏呈现的三个圆形颜色相同，可以为红色(RGB: 255, 0, 0)、蓝色(RGB: 0, 0, 255)或绿色(RGB: 0, 255, 0)。

工作记忆测试包括编码、延迟和提取三个阶段。编码阶段，记忆刺激为三个有方向的圆形光栅(视角 5°×5°左右，对比度 0.5)。同屏呈现的三个光栅方向不同，且角度差不小于 15 °。记忆刺激位置与联结学习阶段刺激位置相同。提取阶段，探测刺激为一个方向随机的圆形光栅(视角 5°×5°，对比度 0.5)，其位置与某个记忆项目相同。此外，从编码阶段开始，屏幕中始终还存在三个中空的圆环(视角 5°×5°)，直到被试反应结束后消失。圆环的位置分别与三个记忆项目对应，且圆环边缘与记忆项目边缘重叠。编码和延迟阶段，三个圆环始终为灰色(RGB: 128, 128, 128)。提取阶段，三个圆环同时变为红色、蓝色或绿色，以提供奖赏线索。

A

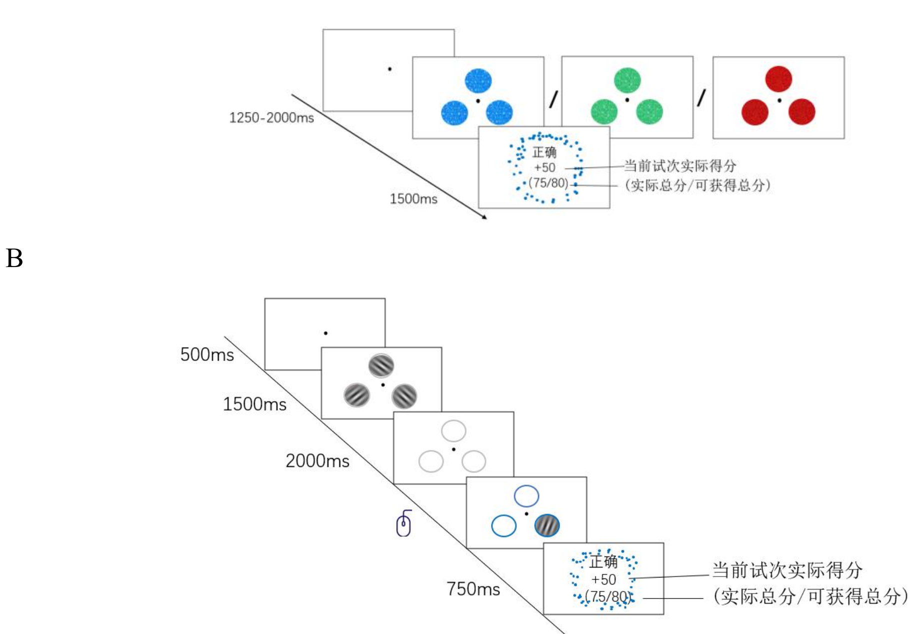


图 1 实验 1(A)联结学习和(B)工作记忆测试阶段流程

2.1.3 实验设计与过程

(1)联结学习阶段

联结学习阶段为单因素 3 水平(奖赏：高、低、无)被试内设计。流程如图 1A 所示。首先呈现一个含注视点的空屏 1250~2000ms，随后呈现三个颜色相同的噪点圆形。噪点颜色为红色、绿色或蓝色，分别对应无奖赏(+0 分)、低奖赏(+5 分)和高奖赏(+50 分)。颜色与奖赏联结的概率为 100%。颜色与奖赏水平的对应关系在被试间平衡。要求被试判断刺激的颜色，并按键反应，红色按“←”键，绿色按“↑”键，蓝色按“→”键。按键与颜色的匹配关系在被试间平衡。被试按键后，根据反应情况给予反馈，持续 1500ms。反馈内容包括反应结果和奖励信息。反应结果分为“正确”、“错误”和“太慢”三种。如果被试在 500ms 内做出正确反应，提示“正确”；做出错误反应，提示“错误”。如果被试反应时间超过 500ms，无论按键是否正确，都提示“太慢”。奖励信息包括(1)当前试次实际得分、(2)实际总分和(3)可获得

总分。其中，实际总分为截止到当前试次被试实际得到的分数之和；可获得总分为如果被试全部反应正确可以得到的分数之和。仅当被试反应正确时，按刺激颜色给予对应的奖励分数，并在文字周围呈现与其得分相同的点数；反应错误或超时都提示 0 分，且文字周围无其他刺激。实验开始前先进行 10 次练习，随后进行正式实验，共 120 个试次。

(2)工作记忆测试阶段

测试阶段为单因素 3 水平(奖赏：高、低、无)被试内设计。流程如图 1B 所示。首先呈现带注视点的空屏 500ms。然后再呈现三个朝向各不相同的圆形光栅，持续 1500ms，要求被试记忆光栅的方向。每个光栅外均包裹一个灰色圆环，光栅消失后，圆环始终保留在屏幕上直到试次结束。延迟期间，圆环颜色不变，延迟 2000ms 后呈现探测项目。探测项目为一个方向随机的圆形光栅，要求被试利用鼠标调节光栅方向，使之与对应位置记忆项目方向一致，调整完毕后松开鼠标并按键盘空格键确认。三个记忆项目被探测的概率相同。探测项目出现的同时，圆环由灰色变为红色、绿色或蓝色(三个圆环颜色相同)，以提示当前试次正确反应可以获得的奖励。颜色与价值的对应关系与联结学习阶段一致。被试按键后，根据反应情况给予反馈，持续 750ms。反馈内容同样包括反应结果和奖励信息。一方面，反应结果分为“正确”和“错误”两种。如果被试报告的角度与目标项目角度之差小于 15°，则提示“正确”；反之，提示“错误”。另一方面，与正确和错误反应伴随的奖励信息，与联结学习阶段相同。实验开始前先进行 10 次练习。随后进行正式实验，共 120 个试次。

实验 1 共需 30 分钟左右。联结学习和记忆测试中，正式实验每完成 40 个试次，提示被试休息一次。

2.2 结果

数据采用 R 3.6.2 和 JASP 0.16.4 软件进行统计分析与处理。剔除正负 3 个标准差以外的数据后进行分析(实验 1 各阶段数据剔除量<1%；实验 2 各阶段数据剔除量<2%)。联结学习阶段以正确率和反应时为指标，通过单因素重复测量方差分析比较各奖赏条件下的差异，以检验是否建立颜色与价值的联结。测试阶段以被试反应的角度偏差作为估计记忆准确性的因变量指标。通过比较各奖赏条件下的差异，考察奖赏对工作记忆准确性的影响。角度偏差的计算方法为：将被试报告的角度与目标项目角度做差后取绝对值。此外，所有涉及三个变量水平的多重比较均采用 Bonferroni 矫正(Dunn, 1961)。

2.2.1 联结学习阶段

分别以正确率和反应时为因变量，进行单因素三水平(奖赏：高、低、无)重复测量方差分析。正确率上，奖赏效应显著($F(2, 46) = 4.14$, $p = 0.022$, $\eta_p^2 = 0.15$, $BF_{10} = 3.604$)。两两比较

发现，高奖赏(M = 0.92)和无奖赏(M = 0.86)条件之间正确率差异边缘显著($t(23) = 2.45$, p = 0.066, Cohen’s d = 0.57)。高奖赏和低奖赏(M = 0.90)、以及低奖赏和无奖赏条件之间正确率差异不显著($ps \geq 0.24$)。反应时上，奖赏效应显著($F(2, 46) = 13.21$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.37$, BF_{10} = 853.416)。高奖赏条件反应时(M = 421.58)显著快于低奖赏(M = 447.00)和无奖赏(M = 462.96)条件($t(23)$ = –2.92 & –4.85, p = 0.023 & $p < 0.001$, Cohen’s d = 0.64 & 1.04)。低奖赏和无奖赏条件之间反应时差异不显著($t(23) = 2.28$, p = 0.098, Cohen’s d = 0.40)(图 2A)。该结果表明被试已成功建立颜色和奖赏之间的联系。

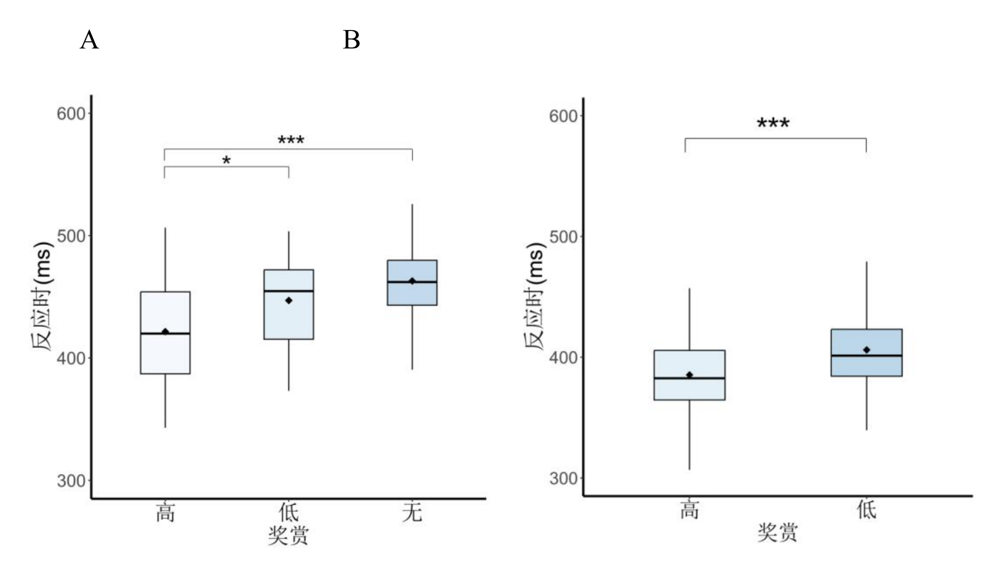


图 2 (A)实验 1 和(B)实验 2 联结学习阶段反应时结果

注：“◆”代表均值。*$p < 0.05$, ***$p < 0.001$

2.2.2 工作记忆测试阶段

对角度偏差进行单因素 3 水平(奖赏：高、低、中)重复测量方差分析。结果发现奖赏主效应显著($F(1, 23) = 6.52$, p = 0.003, $\eta_p^2 = 0.22$, BF_{10} = 13.297) (见图 3)。无奖赏条件的角度偏差(M = 21.20)显著大于高奖赏(M = 16.74)和低奖赏(M = 17.65)条件($t(23)$ = 3.42 & 2.72, p = 0.004 & 0.027, Cohen’s d = 0.74 & 0.59)。但低奖赏和高奖赏条件之间角度偏差的差异不显著($t < 1$)。该结果表明提取阶段呈现的奖赏信号可以提高工作记忆提取准确性。但奖赏的调节作用主要体现在有奖赏和无奖赏条件之间。高奖赏和低奖赏调节作用的差异需进一步检验。同时，奖赏的调节机制也有待考察。

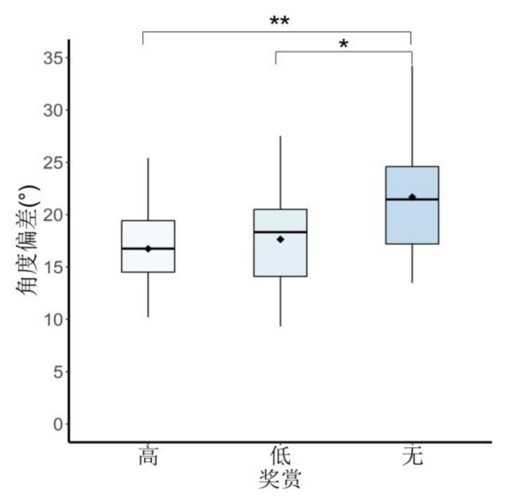


图 3 实验 1 工作记忆测试阶段角度偏差结果

注："◆"代表均值。*$p < 0.05$, **$p < 0.01$

3 实验 2 奖赏调节工作记忆提取准确性的机制

实验 1 发现奖赏可以促进工作记忆提取准确性。有奖赏条件的记忆成绩均好于无奖赏条件。而高、低奖赏条件之间虽有差异却未达到显著水平。因此，实验 2 进一步检验两者的差异。同时采用连续提取任务，以及前、后测实验设计，考察奖赏促进工作记忆提取准确性的机制。实验 2 包括前测、联结学习、后测和信心判断四个阶段。前测阶段无奖赏信号，通过考察提取顺序的影响，检验先、后提取项目记忆成绩的基线水平。后测阶段有奖赏信号，通过考察提取顺序和高奖赏线索位置的影响，检验奖赏对先、后提取项目记忆表征的影响及机制。若奖赏可以调节连续提取过程，则高奖赏对后提取项目记忆成绩的改善可能强于对先提取项目成绩的促进。调节机制方面，若奖赏可以增强记忆表征，则高奖赏项目后提取更有利于提高平均记忆成绩。反之若奖赏的调节机制是资源再分配，则高奖赏项目的提取顺序不影响平均记忆成绩。此外，根据前人研究，奖赏的调节作用可能受到个体能力的影响(Griffin et al., 2019)，因此以未受奖赏影响的前测成绩为标准区分被试工作记忆能力水平，考察奖赏调节机制的个体差异。信心判断阶段要求被试评价自己有多大把握可以根据第一个线索的颜色推测第二个线索颜色，以检验连续提取过程中被试是否对线索顺序有预期。

3.1 方法

3.1.1 被试

使用 G*power 软件估算所需样本量，设置$\alpha = 0.05$，$1-\beta = 0.95$。与实验 1 相同，参考 Grogan 等人(2022)研究中奖赏效应的效应量($\eta_p^2 = 0.21$)，设置 $f = 0.52$，估计出最小样本量为 12。为考察个体差异，招募 60 名在校大学生(其中男性 18 名，女性 42 名)自愿参与本实验，年龄在 18~26 岁之间($M = 22.70$, $SD = 2.10$)。分别将前测成绩前 30%和后 30%的被试作为高

能力和低能力组，每组被试 18 人。实验 2 通过了东北师范大学心理学院伦理委员会审查，被试对实验目的未知，实验报酬根据成绩表现按比例报销。

3.1.2 设备和实验刺激

除以下方面外，实验 2 设备和刺激和实验 1 相同。首先，联结学习阶段的刺激由三个颜色相同的圆形噪点刺激变为两个，分别呈现在以中央注视点为圆心、半径 5°的虚拟圆形的 3 点和 9 点钟方向上，刺激颜色为蓝色或绿色。其次，工作记忆测试包括前测和后测，两者所使用的刺激相同。具体而言，记忆刺激由三个方向不同的圆形光栅变为两个，其呈现位置与联结学习阶段刺激相同。探测刺激是两个依次出现的、方向随机的圆形光栅。同一试次内，两个探测刺激出现位置不同，分别位于屏幕左右两侧，与记忆刺激位置对应；不同试次间，两个探测刺激出现的位置顺序平衡。线索刺激是包裹在探测刺激外周的蓝色或绿色圆环。前后两个线索的颜色在试次间平衡。

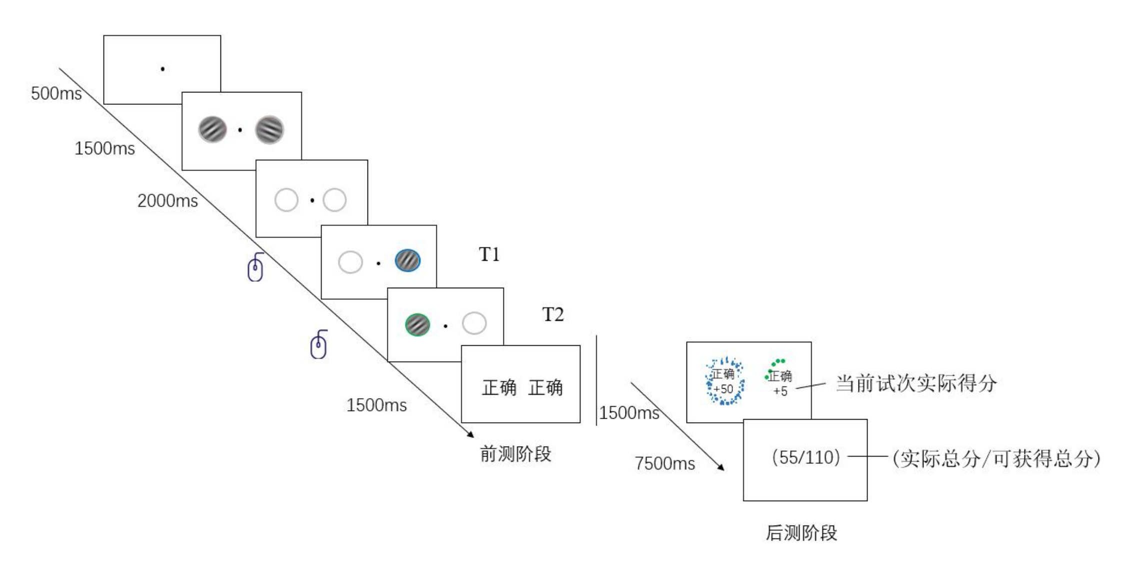


图 4 实验 2 前测、后测阶段流程

3.1.3 实验设计与过程

(1)前测阶段

前测阶段线索颜色与奖赏无关。将线索按颜色分为中性线索 1 和 2，分别与联结学习和后测阶段的高、低奖赏颜色对应(如图 4 中蓝色既是中性线索 1 颜色，也是高奖赏颜色)。根据探测顺序将探测项目分为第一个(T1)和第二个(T2)。中性线索 1 如果与 T1 同时出现则其位置为 SP1(Serial Position 1)，如果与 T2 同时出现则其位置为 SP2 (Serial Position 2)。因此，前测阶段为 2 (中性线索 1 位置：SP1、SP2)×2(探测项目：T1、T2)被试内实验设计。

除以下方面外，实验 2 前测流程与实验 1 工作记忆测试阶段相同(见图 4)。首先呈现注视点 500ms，然后呈现 2 个的圆形光栅，要求被试记忆光栅的方向。光栅消失后延迟 2000ms，

随后连续进行两次记忆探测，每次探测一个记忆项目。每个探测项目出现时，都会伴随一个奖赏线索。线索为蓝色或绿色的圆环，呈现在探测项目外周。同一试次内，前后两个线索颜色不同。最后，在所有探测结束后对被试进行反馈。反馈屏左侧和右侧信息分别提示对应位置项目的反应结果(“正确”或“错误”)。被试先练习 10 个试次，随后完成 120 个实验试次。此外，为了排除被试根据线索顺序预期第二个线索颜色的可能性，增加 24 个填充试次。填充试次中，前后两个线索颜色相同，全为蓝色或绿色的情况各 12 个试次。

(2)联结学习阶段

除以下方面外，实验 2 联结学习阶段流程与实验 1 相同。奖赏刺激仅包括蓝色和绿色两种，分别对应高奖赏(+50 分)和低奖赏(+5 分)。绿色按“←”键，蓝色按“→”键，按键与颜色的匹配关系在被试间平衡。被试先练习 10 个试次，随后完成 120 个实验试次。

(3)后测阶段

后测阶段线索颜色与奖赏水平关联，两者的对应关系与联结学习阶段一致。高奖赏线索位置分为 SP1 和 SP2 两个水平。因此，后测为 2 (高奖赏线索位置：SP1、SP2)×2 (探测项目：T1、T2)被试内实验设计。

除以下方面外，实验 2 后测流程与前测相同(见图 4)。后测反馈信息分两屏呈现。第一反馈屏分别在屏幕左、右两侧提示对应位置项目的(1)反应结果(“正确”、“错误”)和(2)当前试次的实际得分。如果反应正确，则同时在文字周围呈现与得分相同的点数。第二反馈屏在屏幕中央提示截止到当前试次的(1)实际总分和(2)可获得总分。这两个分数均为两个记忆项目成绩的总和。后测包括 10 个练习试次、240 个实验试次和 48 个填充试次。前后两个线索颜色相同，全为蓝色或绿色的情况各 24 个试次。

实验 2 共需 90 分钟左右。正式实验过程中，前测阶段每 48 次休息一次；联结学习阶段每 40 次休息一次；后测阶段每 72 次休息一次。

(4)信心判断

实验结束后，询问被试“在第一个线索出现之后，你有多大的把握可以推测出第二个线索的颜色？”。要求被试对其自信程度进行 7 点评分，7 分对应“完全有信心”，1 分对应“完全没有信心”。

3.2 结果

实验 2 采用 R 3.6.2 和 JASP 0.16.4 软件进行统计分析与处理。数据剔除标准与实验 1 相同。排除 1 名个人平均成绩低于总体平均成绩三个标准差的被试，共获得 59 个有效数据。统计分析具体如下：

(1)奖赏联结学习阶段。以正确率和反应时为指标，采用单因素方差分析比较高、低奖赏条件之间的任务表现差异，以检验颜色与价值之间是否成功建立联结。

(2)工作记忆测试阶段。以被试反应的角度偏差作为估计记忆准确性的因变量指标。首先，对前测的角度偏差进行 2(中性线索 1 位置：SP1、SP2)×2(探测项目：T1、T2)重复测量方差分析，考察提取顺序影响记忆准确性的基线水平。其次，对后测的角度偏差进行 2 (高奖赏线索位置：SP1、SP2)×2 (探测项目：T1、T2)重复测量方差分析，考察奖赏如何调节不同提取顺序项目的记忆准确性。最后，以前测成绩减去后测成绩得到的差值估计奖赏促进量(前测中性线索 1、2 分别与后测高、低奖赏线索条件对应)。①对促进量进行 2 (高奖赏线索位置：SP1、SP2)×2 (探测项目：T1、T2)重复测量方差分析，以检验奖赏对不同提取顺序项目促进程度的差异；②对促进量进行 2 (高奖赏线索位置：SP1、SP2)×2 (探测项目：T1、T2) ×2 (能力：高、低)重复测量方差分析，以检验奖赏促进作用的个体差异。其中，能力是指个体的工作记忆能力，为被试间变量。分别将前测成绩在前 30%和后 30%的被试作为高能力和低能力组。

3.2.1 前测阶段

对前测的角度偏差进行 2×2 重复测量方差分析。结果发现，探测项目主效应显著($F(1, 58) = 66.95$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.54$, $BF_{10} > 1000$)。T2 的角度偏差($M = 15.00$)显著大于 T1 ($M = 10.96$)。说明连续提取过程，先提取项目成绩更好。中性线索 1 位置主效应($F < 1$, $BF_{10} = 142$)和两者交互作用 ($F(1, 58) = 2.42$, $p = 0.125$, $\eta_p^2 = 0.04$, $BF_{10} = 0.328$) 均不显著(图 5A)。该结果表明，后提取项目的记忆成绩受到了先提取项目的干扰。

为进一步确认线索组合方式对实验结果的影响，将前测填充试次数据纳入分析，比较“中性线索 1–中性线索 2”、“中性线索 2–中性线索 1”、“中性线索 1–中性线索 1”、“中性线索 2–中性线索 2”四种条件的平均记忆成绩。单因素方差分析结果显示线索组合方式不影响平均记忆成绩($F < 1$, $BF_{10} = 0.031$)。该结果进一步证实平均记忆成绩不受线索颜色影响。

3.2.2 联结学习阶段

分别以正确率和反应时为因变量，进行单因素两水平(奖赏：高、低)重复测量方差分析。正确率上，奖赏主效应不显著($F(1, 58) = 2.21$, $p = 0.142$, $\eta_p^2 = 0.04$, $BF_{10} = 0.557$)。反应时上，奖赏主效应显著($F(1, 58) = 27.99$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.33$, $BF_{10} > 1000$)。高奖赏条件反应时($M = 385.37$)显著快于低奖赏反应时($M = 406.09$) (图 2B)。该结果表明颜色和奖赏之间成功建立了联结。

3.2.3 后测阶段

对后测的角度偏差进行 2×2 重复测量方差分析。结果发现，探测项目主效应显著(F(1, 58) = 97.58, p < 0.001, η_p^2 = 0.63, BF_{10} > 1000)。T2 的角度偏差(M = 11.17)显著大于 T1 (M = 9.78)。高奖赏线索位置主效应不显著(F(1, 58) = 1.67, p = 0.202, η_p^2 = 0.03, BF_{10} = 0.204)。高奖赏线索位置和探测项目之间交互作用显著(F(1, 58) = 9.00, p = 0.004, η_p^2 = 0.13, BF_{10} = 84.711)。简单效应分析结果显示，探测 T1 时，SP1 条件(M = 9.57)成绩好于 SP2 条件(M = 9.99) (t(58) = –2.33, p = 0.023, Cohen's d = 0.30)；探测 T2 时，SP1 条件(M = 11.55)成绩差于 SP2 条件(M = 10.78) (t(58) = 2.69, p = 0.009, Cohen's d = 0.35) (图 5B)。该结果表明，虽然总体上后提取项目成绩仍明显受到先提取项目的干扰，但相比于低奖赏条件，高奖赏线索对先提取和后提取项目成绩均有促进。并且，高奖赏线索位置主效应不显著表明奖赏的调节机制为资源再分配。

为进一步确认线索组合方式对实验结果的影响，将后测填充试次数据纳入分析，比较“高奖赏线索–低奖赏线索”、“低奖赏线索–高奖赏线索”、“高奖赏线索–高奖赏线索”、“低奖赏线索–低奖赏线索”四种条件的平均记忆成绩。单因素方差分析结果显示线索组合方式不影响平均记忆成绩(F(3, 174) = 0.57, p = 0.636, η_p^2 = 0.01, BF_{10} = 0.041)。该结果进一步证实平均记忆成绩不受高、低奖赏线索组合方式影响，即支持资源再分配理论。

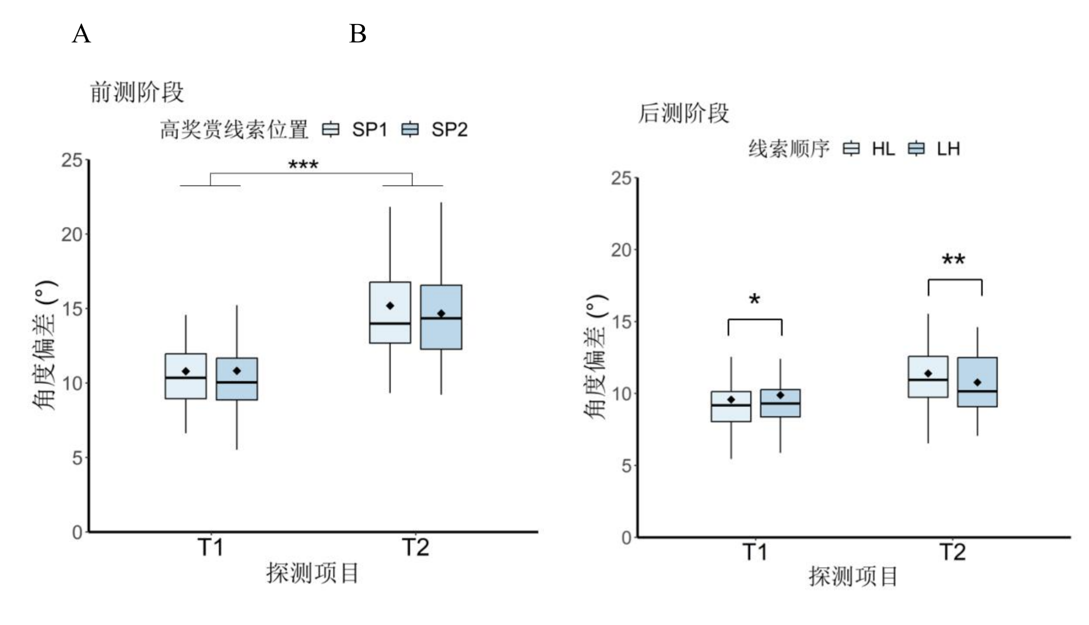


图 5 实验 2(A)前测阶段和(B)后测阶段角度偏差结果

注：“◆”代表均值。*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

3.2.4 前、后测比较

首先，对促进量进行 2×2 重复测量方差分析。结果发现探测项目主效应显著(F(1, 58) = 23.66, p < 0.001, η_p^2 = 0.29, BF_{10} > 1000)。T2 的促进量(M = 3.83)显著大于 T1 (M = 1.17)。高奖赏线索位置主效应不显著(F(1, 58) = 1.07, p = 0.305, η_p^2 = 0.02, BF_{10} = 0.168)。两者交互作用显

著($F(1, 58) = 8.61$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.13$, $BF_{10} = 2.670$)。简单效应分析发现，探测 T1 时，SP1 ($M = 1.52$)和 SP2 ($M = 0.83$)条件差异显著($t(58) = 2.30$, $p = 0.025$, Cohen's $d = 0.30$)；探测 T2 时，SP1 ($M = 3.21$)和 SP2 ($M = 4.44$)条件差异显著($t(58) = -2.41$, $p = 0.019$, Cohen's $d = 0.31$)。该结果表明，一方面高奖赏线索对先提取和后提取项目均有明显促进；另一方面，奖赏对后提取项目的促进作用强于先提取项目(图 6)。



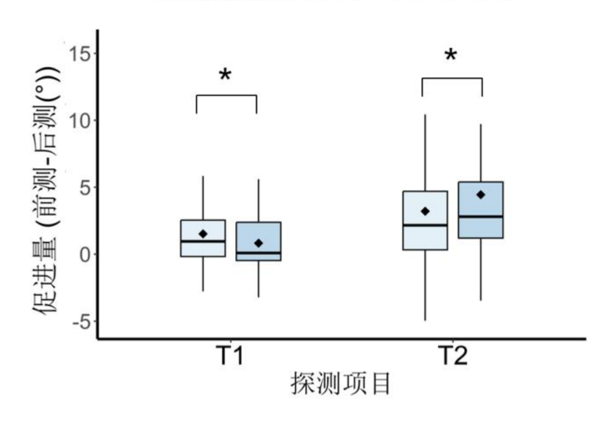


图 6 实验 2 奖赏促进量(前测–后测)结果

注：“◆”代表均值。*$p < 0.05$

最后，对促进量进行 2 (高奖赏线索位置：SP1、SP2)×2 (探测项目：T1、T2) ×2 (能力：高、低)重复测量方差分析。结果发现高奖赏线索位置主效应不显著($F(1, 34) = 1.53$, $p = 0.225$, $\eta_p^2 = 0.04$, $BF_{10} = 0.215$)。探测项目主效应显著($F(1, 34) = 20.96$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.38$, $BF_{10} > 1000$)。能力主效应显著($F(1, 34) = 29.71$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.47$, $BF_{10} > 1000$)。低能力组促进量($M = 5.19$)显著大于高能力组($M = 0.56$)。二阶交互作用方面，高奖赏线索位置和探测项目的交互作用、探测位置和能力的交互作用均显著 ($F(1, 34) = 7.55$ & 11.53, $p = 0.010$ & 0.002, $\eta_p^2 = 0.18$ & 0.25, $BF_{10} = 1.429$ & $BF_{10} > 1000$)。高奖赏线索位置和能力的交互作用不显著($F(1, 34) = 2.07$, $p = 0.159$, $\eta_p^2 = 0.06$, $BF_{10} = 0.309$)。三阶交互作用显著($F(1, 38) = 5.05$, $p = 0.031$, $\eta_p^2 = 0.13$, $BF_{10} = 1.038$)。简单效应分析显示，高能力组中，探测项目主效应显著($F(1, 17) = 5.60$, $p = 0.030$, $\eta_p^2 = 0.25$, $BF_{10} = 3.978$)；高奖赏线索位置主效应和两者交互作用均不显著 ($Fs < 1$, $BF_{10} = 0.240$ & 0.412)。低能力组中，探测项目主效应显著($F(1, 17) = 16.95$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.50$, $BF_{10} > 1000$)；高奖赏线索位置主效应不显著($F(1, 17) = 2.28$, $p = 0.149$, $\eta_p^2 = 0.12$, $BF_{10} = 0.306$)；两者交互作用显著($F(1, 17) = 7.46$, $p = 0.014$, $\eta_p^2 = 0.31$, $BF_{10} = 2.147$)。简单效应分析发现，探测 T1 时，SP1 ($M = 2.95$)和 SP2 ($M = 1.76$)条件差异不显著($t(17) = 1.57$, $p = 0.146$, Cohen's $d = 0.36$)；探测 T2 时，SP1 ($M = 6.59$)和 SP2 ($M = 9.42$)条件差异显著($t(17) = -2.62$, $p = 0.018$,

Cohen's $d = 0.62$) (图 7)。该结果表明，高能力组中奖赏促进量主要受到探测顺序调节，与高奖赏线索位置无关。低能力组中奖赏的促进作用主要体现在第二次提取过程中。

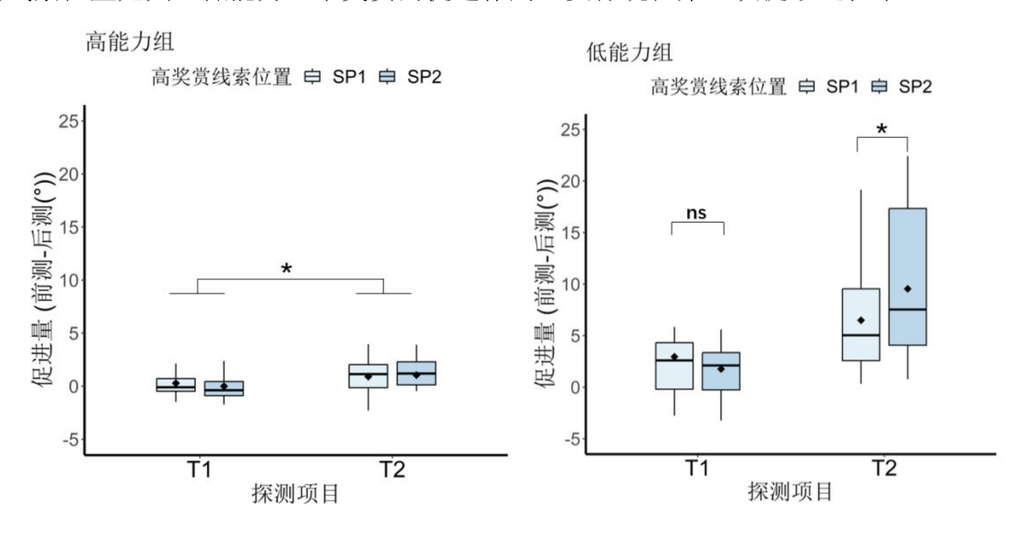


图 7 实验 2 奖赏促进量(前测−后测)个体差异

注：“◆”代表均值。$^*p < 0.05$

3.2.5 信心判断

被试信心判断的平均值为 3.53。单样本 t 检验结果显示该值显著低于中间值 4(“不确定”) ($t(59) = –2.71$, $p = 0.009$)，即被试不能提前推测出第二个线索的颜色。

4 讨论

本文通过 2 个实验探究提取阶段出现的奖赏信号对工作记忆提取过程的影响及其机制。首先，实验 1 和 2 均发现奖赏可以直接影响工作记忆的提取准确性。实验 1 中虽然高、低奖赏条件的记忆成绩差异未达到显著水平，但两者均好于无奖赏条件。实验 2 后测中高奖赏线索位置和探测项目的交互作用证实了相比于低奖赏条件，高奖赏线索可以提高提取准确性。其次，实验 2 发现奖赏对后提取项目(T2)的影响大于先提取项目(T1)。前、后测的比较结果发现，虽然奖赏对 T1 和 T2 提取成绩均有促进，但 T2 的奖赏促进量大于 T1。最后，实验 2 还发现奖赏对提取准确性的影响及其机制受到个体工作记忆能力差异的调节。高能力组中，奖赏对提取准确性的促进受探测项目位置影响，不受高奖赏线索位置影响；低能力组中，奖赏对提取准确性的促进受到探测项目位置和高奖赏线索位置的交互影响。

本研究首次观察到奖赏可以在不影响编码和保持的条件下，直接调节工作记忆提取过程。这表明个体不仅可以根据项目价值在学习之前或学习过程中调整认知策略从而促进工作记忆加工(Dodgson & Raymond, 2020; Hitch et al., 2018, 2020; Hu et al., 2014; Klink et al., 2017; Lin & Fougnie, 2022; Sandry & Ricker, 2020; Thomas et al., 2016)，也可以在学习之后根据测验所设置

的价值信息直接调整提取准确性。这种灵活的工作记忆调节机制对促进人类认知活动和社会适应具有重要作用。但该发现与 Klink 等人(2017)的发现并不一致。他们分别在编码、保持和提取阶段呈现奖赏线索，结果却发现直接作用于提取过程的奖赏线索不影响工作记忆任务表现。一方面，这可能与他们的实验任务更加复杂有关。本研究实验 1 与他们的实验均为单次提取任务，且探测类型相同，仅奖赏线索呈现方式不同。他们同屏呈现高、低和无三种水平的奖赏线索。而本研究实验 1 同屏只呈现一种水平的奖赏线索，任务设置可能更有利于奖赏发挥作用。被试只需根据当前屏幕上线索的奖赏水平调动认知资源，而不需根据价值高低在同屏不同项目之间进行资源分配。另一方面，这也可能表明奖赏对提取准确性的影响是整体性的，难以在空间上基于项目价值进一步精细分配。后续研究可进一步检验该推测。

奖赏对工作记忆提取准确性的调节机制方面，总体上表现为对工作记忆资源的再分配，同时也受到提取项目位置和个体工作记忆能力差异的影响。以往研究发现，先提取的项目会自动进入注意焦点，并损害后提取项目记忆表征(Park et al., 2017; Woodman & Vecera, 2011)。因此，如果奖赏对提取阶段的调节机制是在不影响低奖赏项目表征的基础上对高奖赏项目投入额外的认知资源，那么当后提取项目对应高奖赏时，前后两次提取将分别受到自动化加工和策略加工的促进，进而使记忆成绩提高。即 SP2 条件(高奖赏项目后提取)的记忆成绩应高于 SP1 条件(高奖赏项目先提取)。但实验 2 结果不支持这种假设。实验 2 结果表明，总体上实验试次的提取准确性不受高奖赏线索位置影响。此外，将填充试次纳入分析，也没有发现高、低奖赏线索的组合方式会影响平均记忆成绩。即同一试次中无论高奖赏线索先出现还是后出现、无论高奖赏线索出现两次还是不出现，平均记忆成绩都不受影响。因此，奖赏对提取过程的调节是将总量固定的、有限的资源按照价值在不同项目之间重新再分配(Hitch et al., 2018; Hu et al., 2014; Sandry & Ricker, 2020)。

提取项目位置对奖赏调节机制的影响主要表现为：奖赏对后提取项目的促进更大。总体上实验 2 后测发现，先提取项目的成绩始终好于后提取项目，即奖赏没有转变后提取项目的加工劣势。但这并不意味着奖赏不能调节后提取项目的表征。实际上，奖赏对后提取项目的影响更大——前、后测比较发现奖赏对 T2 的促进量更大。即奖赏对工作记忆提取的调节主要表现为对后提取项目劣势的明显改善，而非消除。该结果也为解释 Klink 等人(2017)和本研究发现之间的争议提供了另一种思路。他们仅要求被试进行一次提取，因而奖赏的调节作用更难以体现出来。而本研究实验 2 要求被试连续进行两次提取，奖赏的调节作用在第二次提取过程中更突出。

最后，奖赏对工作记忆提取准确性的调节机制受到个体工作记忆能力的影响，工作记忆

能力越低的个体越倾向于使用认知策略促进任务表现。高能力组中，奖赏对 T2 项目的促进大于 T1，且该促进作用不受高奖赏线索位置影响。这表明高能力组被试有足够的认知资源对所有记忆项目进行高精度的表征，无须根据价值水平调整认知策略就可以改善后提取项目的劣势。Griffin 等人(2019)研究也发现，高工作记忆能力的个体虽然对高价值词对具有选择性偏好，但这种影响非常微弱。低能力组中，奖赏的促进作用受到探测顺序和高奖赏线索位置的交互影响。高奖赏线索对 T1 的促进作用与低奖赏线索无差异；而对 T2 的促进作用显著强于低奖赏线索。但总体上，高奖赏线索位置对平均记忆成绩无影响。这表明，低能力组被试比高能力组被试更易于受到项目奖赏水平变化的影响，并且其奖赏调节作用遵循资源再分配的机制。以往关于工作记忆能力和策略使用的相关研究也指出，个体为使收益最大化会在编码过程中使用更有效的策略，尤其是低工作记忆能力的个体(Turley-Ames & Whitfield, 2003)。但也有研究指出，低工作记忆能力的个体自发地使用有效编码策略的频率低于高工作记忆能力个体(Robison & Unsworth, 2017)。本研究中，实验 2 任务仅要求记忆两个项目，任务负荷较低，可能不利于奖赏的调节作用在高能力组中显现出来。后续研究可以进一步考察工作记忆负荷与个体能力差异对奖赏调节作用的交互影响。

5 结论

通过对认知资源进行再分配，奖赏可以在不影响编码和保持的条件下直接促进工作记忆提取准确性。连续提取过程中，该促进作用对后提取项目的影响强于先提取项目。并且，工作记忆能力低的个体更容易受到奖赏的调节。

参 考 文 献

Allen, R. J., & Ueno, T. (2018). Multiple high-reward items can be prioritized in working memory but with greater vulnerability to interference. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(7), 1731–1743.

Atkinson, A. L., Berry, E. D. J., Waterman, A. H., Baddeley, A. D., Hitch, G. J., & Allen, R. J. (2018). Are there multiple ways to direct attention in working memory? *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1424*(1), 115–126.

Baddeley, A. D. (1992). Working Memory. *Science*, *255*(5044), 556–559.

Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 417–423.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, *8*, 47–89.

Beck, S. M., Locke, H. S., Savine, A. C., Jimura, K., & Braver, T. S. (2010). Primary and secondary rewards

differentially modulate neural activity dynamics during working memory. *PLoS ONE*, *5*(2), e9251.

Bowen, H. J., Marchesi, M. L., & Kensinger, E. A. (2020). Reward motivation influences response bias on a recognition memory task. *Cognition*, *203*, 104337.

Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(4), 1158–1170.

Dodgson, D. B., & Raymond, J. E. (2020). Value associations bias ensemble perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(1), 109–117.

Dunn, O. J. (1961). Multiple Comparisons among Means. *Journal of the American Statistical Association*, *56*(293), 52–64.

Eriksson, J., Vogel, E. K., Lansner, A., Bergström, F., & Nyberg, L. (2015). Neurocognitive Architecture of Working Memory. *Neuron*, *88*(1), 33–46.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175–191.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, *41*(4), 1149–1160.

Gong, M., & Li, S. (2014). Learned reward association improves visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(2), 841–856.

Gong, M., Yang, F., & Li, S. (2016). Reward association facilitates distractor suppression in human visual search. *European Journal of Neuroscience*, *43*(7), 942–953.

Griffin, M. L., Benjamin, A. S., Sahakyan, L., & Stanley, S. E. (2019). A matter of priorities: High working memory enables (slightly) superior value-directed remembering. *Journal of Memory and Language*, *108*, 104032.

Grogan, J. P., Randhawa, G., Kim, M., & Manohar, S. G. (2022). Motivation improves working memory by two processes: Prioritisation and retrieval thresholds. *Cognitive Psychology*, *135*, 101472.

Hitch, G. J., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2020). Attention and binding in visual working memory: Two forms of attention and two kinds of buffer storage. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(1), 280–293.

Hitch, G. J., Hu, Y., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2018). Competition for the focus of attention in visual working memory: Perceptual recency versus executive control. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1424*(1), 64–75.

Hu, Y., Hitch, G. J., Baddeley, A. D., Zhang, M., & Allen, R. J. (2014). Executive and perceptual attention play different roles in visual working memory: Evidence from suffix and strategy effects. *Journal of Experimental*

Psychology: Human Perception and Performance, *40*(4), 1665–1678.

Kiss, M., Driver, J., & Eimer, M. (2009). Reward priority of visual target singletons modulates event-related potential signatures of attentional selection. *Psychological Science*, *20*(2), 245–251.

Klink, P. C., Jeurissen, D., Theeuwes, J., Denys, D., & Roelfsema, P. R. (2017). Working memory accuracy for multiple targets is driven by reward expectation and stimulus contrast with different time-courses. *Scientific Reports*, *7*(1), 9082.

Klyszejko, Z., Rahmati, M., & Curtis, C. E. (2014). Attentional priority determines working memory precision. *Vision Research*, *105*, 70–76.

Lin, Y., & Fougnie, D. (2022). No evidence that the retro-cue benefit requires reallocation of memory resources. *Cognition*, *229*, 105230.

Myers, N. E., Chekroud, S. R., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2018). Benefits of Flexible Prioritization in Working Memory Can Arise Without Costs. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 44*(3), 398–411.

Park, H. B., Zhang, W., & Hyun, J. S. (2017). The aftermath of memory retrieval for recycling visual working memory representations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *79*(5), 1393–1407.

Peirce, J. W. (2007). Psychopy-psychophysics software in python. *Journal of Neuroscience Methods*, *162*(1–2), 8–13.

Peirce, J. W., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M. R., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. (2019). PsychoPy2: experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, *51*(1), 195–203.

Peirce, J. W., Hirst, R. J. & MacAskill, M. R. (2022). *Building Experiments in PsychoPy* (2nd ed.). Sage.

Rerko, L., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2014). Retro-cue benefits in working memory without sustained focal attention. *Memory & Cognition*, *42*(5), 712–728.

Robison, M. K., & Unsworth, N. (2017). Working memory capacity, strategic allocation of study time, and value-directed remembering. *Journal of Memory and Language*, *93*, 231–244.

Sandry, J., & Ricker, T. J. (2020). Prioritization within visual working memory reflects a flexible focus of attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(6), 2985–3004.

Taylor, S. F., Welsh, R. C., Wager, T. D., Phan, K. L., Fitzgerald, K. D., & Gehring, W. J. (2004). A functional neuroimaging study of motivation and executive function. *NeuroImage*, *21*(3), 1045–1054.

Thomas, P. M. J., FitzGibbon, L., & Raymond, J. E. (2016). Value conditioning modulates visual working memory processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *42*(1), 6–10.

Turley-Ames, K. J., & Whitfield, M. M. (2003). Strategy training and working memory task performance. *Journal of*

Memory and Language, *49*(4), 446–468.

Valentin, V. V., & O'Doherty, J. P. (2009). Overlapping prediction errors in dorsal striatum during instrumental learning with juice and money reward in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, *102*(6), 3384–3391.

Woodman, G. F., & Vecera, S. P. (2011). The cost of accessing an object's feature stored in visual working memory. *Visual Cognition*, *19*(1), 1–12.

Reward Facilitates Working Memory Precision during Retrieval

NIU Hui[1], HU Yanmei[1], ZHENG Xutao[1], JIANG Yingjie[1], LIU Jia[1]

([1] School of Psychology, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract

Reward can improve working memory performance. However, there has been controversy on whether reward can regulate the retrieval of working memory. Some studies have presented reward signals before the retrieval stage, with the results showing that reward can affect the retrieval phase during working memory. Klink et al. (2017) indicated that reward cues presented in the retrieval phase cannot affect working memory. However, this finding lacks support in the literature and needs to be further tested. The present study aims to explore the mechanism and effect of reward on the precision of working memory during retrieval.

A total of 24 participants (experiment 1) and 60 participants (experiment 2) were recruited for two experiments. Experiment 1 included two stages: association learning and memory test. The participants first established the connection between color and value through association learning. Thereafter, a working memory test was conducted. Reward cues were presented with the memory probe during the working memory test. Experiment 2 included four stages: pretest, association learning, posttest, and confidence assessment. Pre- and post-test tasks were the same, in which the participants performed two memory tests in sequence during the retrieval phase. Colored cues were not related to rewards in the pre-test but associated with rewards in the post-test. Confidence judgment required the participants to evaluate their confidence that they can infer the color of the second cue based on the color of the first cue. This undertaking aimed to test whether the participants have expectations for the order of cues.

Results of experiment 1 showed that the effect of reward was significant in the memory test stage. In particular, memory performance with high and low reward cues was better than that with no reward cues. Results of the post-test of experiment 2 showed a significant main effect of test order. Memory performance of the first test item was particularly better than that of the second test item. Moreover, there was a significant test order by serial position of the high-reward cue

interaction effect. Memory performance of the first test item was better when the high-reward cue appeared before the low-reward cue. Memory performance of the second test item was better when the low reward cue appeared before the high-reward cue. The participants' working memory capacity was differentiated according to their performance during the pre-test to investigate the individual differences of the reward effects. Results likewise indicated that reward did not affect the memory performance of the high-capacity group. For the low-capacity group, memory performance was affected by the test order, serial position of the high-reward cue, and their interaction. Thus, the effect of reward was more evident with the low-capacity group.

The present study was the first to observe that rewards can directly regulate working memory retrieval without affecting encoding and retention. In addition, the regulation mechanism of reward on working memory retrieval involved the redistribution of working memory resources. Such a reward regulation was affected by the test order and working memory capacity. Moreover, findings indicated that individuals can adjust cognitive strategies before or during learning according to the item value to promote working memory processing. They can also adjust retrieval precision after learning according to the value of information set by the test. This flexible working memory regulation mechanism plays an important role in promoting human cognitive activities and social adaptation.

Keywords working memory, reward, retrieval precision